МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 004.75 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-205-215

Нейросетевая технология идентификации размеров дефекта в полуплоскости на основе временного и позиционного сканирования



А. Н. Соловьев[1,2], А. В. Черпаков[1,2], П. В. Васильев[1], И. А. Паринов[2], Е. В. Кириллова[3]
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2] ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[3]Рейн-Майн Университет прикладных наук (г. Висбаден, ФРГ)

Введение. Актуальность выбранной темы исследования обусловлена необходимостью проведения быстрой оценки состояния и надежности материалов, применяемых в различных конструкциях. Целью работы явилось исследование параметров влияния дефекта на отклик поверхности среды на ударное воздействие. ешение обратной задачи о восстановлении радиуса дефекта базируется на основе сочетания расчетного подхода и применения искусственных нейронных сетей (*ИНС*). Авторами построена методика восстановления параметров дефекта на основе применения численного моделирования и *ИНС*.
Материалы и методы. Поставленная задача решается в плоской постановке с помощью метода конечных элементов (*МКЭ*). В работе использовались линейные уравнения теории упругости с учетом диссипации энергии. В качестве метода решения краевой задачи применялся метод конечных элементов, реализованный в пакете *ANSYS*. В качестве моделирования процесса применения (*ИНС*) — комплекс *MATLAB*.
Результаты исследования. Разработана конечно-элементная модель слоистой конструкции в плоской постановке задачи в пакете *ANSYS*. Решена задача определения нестационарных колебаний при импульсном нагружении для различных вариаций радиуса дефекта. Применено позиционное сканирование объекта исследований. Построены графические зависимости амплитуд колебаний точек на поверхности от радиуса дефекта.
Обсуждение и заключения. В качестве результатов исследования зависимостей откликов колебаний от радиуса дефекта был разработан подход к восстановлению данного параметра в плоской конструкции на основе сочетания метода конечных элементов и *ИНС*. Исследование показало, что использованного объема данных достаточно для успешного обучения построенной модели *ИНС* и проведения идентификации скрытого дефекта в конструкции.

Ключевые слова: плоская слоистая конструкция, дефект, неразрушающая диагностика, конечно-элементное моделирование, импульсное воздействие, нестационарные колебания, поверхностные волны, искусственные нейронные сети, позиционное сканирование, амплитудно-временные характеристики.

***Для цитирования*:** Нейросетевая технология идентификации размеров дефекта в полуплоскости на основе временного и позиционного сканирования / А. Н. Соловьев, А. В. Черпаков, П. В. Васильев [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т.20, №3. — С. 205–215. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-205-215

Финансирование: работа выполнена при поддержке внутреннего гранта Южного федерального университета № ВнГр-07/2020-04-ИМ (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

Neural network technology for identifying defect sizes in half-plane based on time and positional scanning

A.N. Solov'ev[1,2], A.V. Cherpakov[1,2], P.V. Vasil'ev[1], I.A. Parinov[2], E.V. Kirillova[3]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[3] RheinMain University of Applied Sciences (Wiesbaden, Germany)

Introduction. The selected research topic urgency is due to the need for a quick assessment of the condition and reliability of materials used in various designs. The work objective was to study parameters of the influence of the defect on the response of the surface of the medium to the shock effect. The solution to the inverse problem of restoring the radius of a defect is based on the combination of a computational approach and the use of artificial neural networks (ANN). The authors have developed a technique for restoring the parameters of a defect based on the computational modeling and ANN.
Materials and Methods. The problem is solved in the flat setting through the finite element method (FEM). In this paper, we used the linear equations of the elasticity theory with allowance for energy dissipation. The finite element method implemented in the *ANSYS* package was used as a method for solving the boundary value problem. *MATLAB* complex was used as a simulation of the application process (ANN).
Results. A finite element model of a layered structure has been developed in a flat formulation of the problem in the *ANSYS* package. The problem of determining unsteady vibrations under pulsed loading for different radius variations of the defect is solved. Positional scanning of the research object is applied. Graphical dependences of the vibration amplitudes of points on the surface on the defect radius are plotted.
Discussion and Conclusions. As a result of studying the dependences of vibration responses on the defect radius, the authors have developed an approach to restore this parameter in a flat structure based on a combination of the FEM and ANN. The research has shown that the amount of data used is sufficient for successful training of the constructed ANN model and identification of a hidden defect in the structure.

Keywords*:* flat layered structure, defect, non-destructive diagnostics, *FE* modeling, impulse action, unsteady oscillations, surface waves, artificial neural networks, positional scanning, amplitude-time characteristics.

For citation: A.N. Solov'ev, A.V. Cherpakov, P.V. Vasil'ev, et al. Neural network technology for identifying defect sizes in half-plane based on time and positional scanning. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 205–215. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-205-215

Funding information: the research is supported by an internal grant from the Southern Federal University no. ВнГр-07/2020-04-ИМ (RF Ministry of Science and Higher Education)

Введение. Существует обширный перечень различных строительных, мостовых конструкций, зданий, оснований, грунтов, композитных материалов, которые эксплуатируются в различных условиях. Конструкции могут иметь достаточно большой ресурс эксплуатации и дефекты различной конфигурации: трещины, полости, включения, коррозионные изменения структуры, вмятины и пр. Вследствие этого могут возникать непредвиденные предаварийные состояния и отказы конструкции. Для предупреждения аварийного состояния требуется решение задачи их ранней диагностики.

Этот факт определяет необходимость использования различных методов неразрушающего контроля [1–2]. Некоторые направления развития отдельных методов диагностики наличия дефектов в различных объектах представлены в [3–10].

Основа методов состоит в сборе и анализе определенных параметров конструкции, являющихся откликом при ее нагружении. В качестве одного из таких параметров может быть вибросмещение определенных точек поверхности при импульсном нагружении колебаний конструкции. При этом от места возбуждения колебаний распространяется волновой фронт, возбуждающий смещение точек и колебания всех элементов конструкции. Задача может быть сведена к рассмотрению измерения скоростных параметров распространения волнового поля. Основываясь на анализе публикаций в иностранной литературе, можно констатировать, что экспериментальные исследования показывают явную тенденцию к оперированию методом «измерения скорости» [11–12].

Применение специализированных приборов, которые располагаются в определенных точках объекта и осуществляют сбор информации о различных параметрах колебаний, описаны в [13, 14]. Данная методика предполагает позиционное, временное и частотное сканирование объектов исследования. Наиболее привлекательным является использование акустических датчиков и приемников, установленных на внешней поверхности конструкции. Данные датчики могут фиксировать отраженные сигналы от дефектов. Применение

диагностических систем и комплексов требует разработки программного обеспечения (*ПО*), которое позволяет производить первичный анализ сигнала. В случае «тонкой» приборной настройки, например, при применении специальных алгоритмов обработки по анализу отраженного сигнала, *ПО* позволяет идентифицировать дефектную область конструкции. Соответствующее *ПО* может быть разработано на основе использования искусственной нейронной сети (*ИНС*) [15]. Применение *ИНС* в задачах реконструкции поврежденного состояния элементов конструкций описано в работах [16–26]. Применение различных архитектур и алгоритмов *ИНС* описано в [16–20]. Определению дефектов в анизотропных пластинах с помощью *ИНС* посвящена работа [21]. В работе [22] авторы указали преимущества методов идентификации, не требующих предварительного построения математической модели объекта исследования.

В настоящей работе разрабатывается метод реконструкции диаметра круглого дефекта, расположенного в полуплоскости слоистой конструкции. Такого рода дефекты могут часто встречаться при вскрытии верхних слоев грунтов в виде уплотнений каменных структур под слоями дорожной одежды. Модуль упругости и плотность таких структур могут в разы отличаться от основных параметров слоя. В математической постановке проблема сводится к решению обратной геометрической задачи теории упругости [27]. Рассматривается построение алгоритма восстановления информации об объекте, локализованном в определенном месте. Для этого рассматривается применение метода *КЭ*, анализ результатов поверхностных волн и корреляционный анализ зависимости параметров дефекта от волнового поля отклика с применением *ИНС*.

Материалы и методы. Предлагается подход целью которого является восстановление информации о параметрах дефектной области конструкции на основе анализа отклика поверхности среды на ударное воздействие. Анализ осуществляется на основе построенных алгоритмов при сочетании расчетного подхода и применения *ИНС*. В качестве образца рассмотрен слоистый материал.

Нагружение конструкции импульсным ударным воздействием производится на некотором расстоянии от исследуемой зоны, а датчики, регистрирующие колебания, располагаются в определенных позициях и последовательности в линейном направлении зоны исследования. Могут измеряться поперечные и продольные колебания. Интерес представляет период времени, когда волны, отраженные от концов моделируемого участка конструкции, не успевают достичь датчика. Таким способом имитируется моделирование реальных условий эксплуатации слоистой конструкции грунтового основания. Анализ измеренных амплитудно-временных характеристик (*АВХ*) показывает возможность их использования в обратных задачах восстановления дефектов.

В качестве инструмента решения обратной задачи реконструкции параметров дефекта используется *ИНС*, которые изначально проектировались для решения задач определения нелинейных зависимостей в многомерных массивах данных. В отличие от других алгоритмов, *ИНС* не программируются, а обучаются на множестве данных для исследуемых параметров конструкции. Обучающие выборки строятся путем решения прямых задач в конечно-элементном (*КЭ*) пакете *ANSYS*. Обученная сеть, получив новые, неизвестные ранее результаты анализа, способна корректно распознать параметры дефекта.

Эффективные применения аналитического и численного моделирования, достаточно хорошо коррелирующие с восстанавливаемыми параметрами элементов конструкций, представлены в [28–34].

Постановка задачи. Поставленная задача решается в плоской постановке с помощью метода конечных элементов (*МКЭ*). В настоящей работе используются линейные уравнения теории упругости с учетом диссипации энергии, принятой в пакете *ANSYS* [34, 35].

Для упругой среды:

$$\rho\ddot{u}_i + \alpha\rho\dot{u}_i - \sigma_{ij,j} = f_i\,;$$
$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}(\varepsilon_{kl} + \beta\dot{\varepsilon}_{kl})\,;$$
$$\varepsilon_{kl} = \frac{u_{k,l} + u_{l,k}}{2},$$

где ρ — плотность материала; u_i — компоненты вектора-функции перемещений; $\sigma_{i,j}$ — компоненты тензора механических напряжений; f_i — компоненты вектора плотности массовых сил; ε_{kl} — компоненты тензора деформаций; c_{ijkl} — компоненты тензора четвертого ранга упругих модулей; α — неотрицательные коэффициенты демпфирования (в ANSYS).

Рассмотрим подробнее механические краевые условия. При определении механических граничных условий граница тела представляется в виде объединения непересекающихся областей $S = S_u S_t S_{ut}$, на которых задаются следующие условия:

— условие закрепления границы или заданных перемещений:

$$u_i|_{S_u} = u_i^0,$$

— условие силового воздействия, при которых заданы компоненты вектора механических напряжений:

$$t_i = \sigma_{ij} n_j\big|_{S_t} = p_i,$$

— условие гладкого контакта с абсолютно твердым телом — равенство нулю нормальных перемещений и касательных напряжений:

$$u_n = u_i n_i|_{S_{ut}} = 0, t_i^{(k)} = \sigma_{ij} n_j \tau_i^{(k)}\big|_{S_{ut}} = 0.$$

Описание модели. Рассматривается слоистая конструкция. Верхний слой жестко сцеплен с подстилающим полупространством (рис. 1). В слое 1 расположен дефект в виде круглой конфигурации с центром на определенной глубине. Свойства материала представлены в таблице 1. Дефект расположен на глубине Y_{loc} = 1,5 м от поверхности и на расстоянии X_{loc} = 2 м от точки P_1 приложения единичного импульсного P_t (рис. 1) нагружения. Импульсное нагружение зависит линейно от времени приложения нагрузки ($\tau = 0{,}003$ с), что соответствует параметрам реального ударного нагружения (рис. 2). В качестве входного параметра рассматривается поле смещений поверхности в результате кратковременного импульсного воздействия. Радиус дефекта варьируется в расчетах как: R_i = 0; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5 м. В качестве базовой цели ставится определение функциональной зависимости радиуса дефекта от откликов колебаний, измеренных в определенных точках конструкции на основе применения ИНС.

Таблица 1

Параметры слоев

№	Наименование	Толщина, *м*	Е, Гпа	ρ, кг/м^3	ν	Коэффициент затухания
1	Слой 1	5	0,1	2000	0,33	0,001
2	Подстилающий слой	0,1	0,1	2000	0,33	0,1
3	Дефект R_i	X_{CENTER}=2 Y_{CENTER}= −1,5	1	2000	0,33	0,001

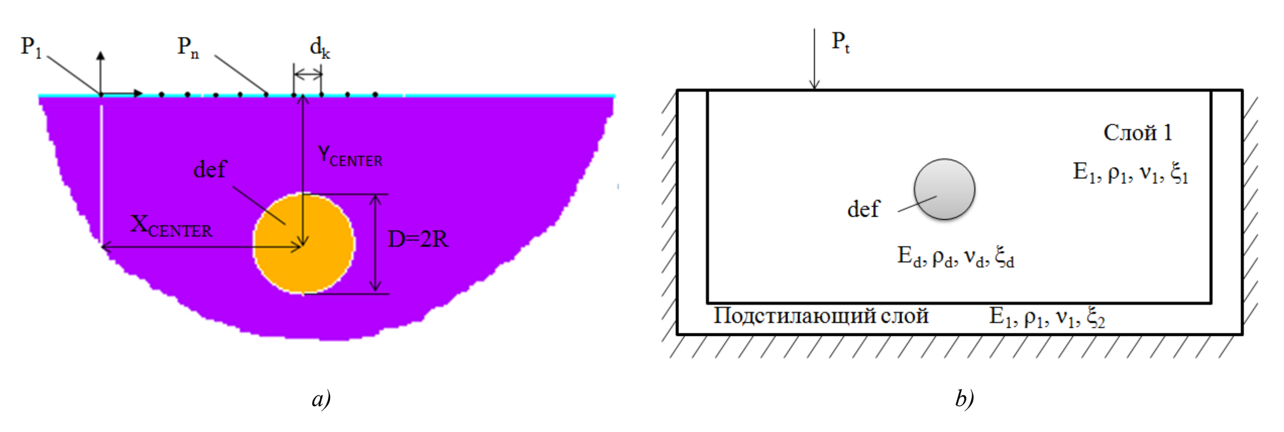


Рис. 1. Модель слоистой конструкции с круглым внутренним дефектом:
а — описание области с дефектом; b — схема модели слоистой конструкции

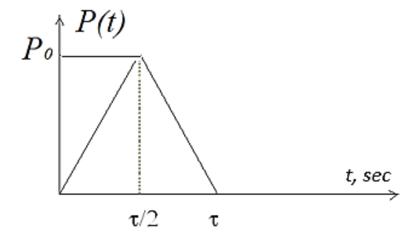


Рис. 2. Зависимость импульсной нагрузки P от времени нагружения

***КЭ* моделирование.** Моделирование плоской конструкции (ширина — *10 м*) с дефектом проведено в *КЭ* комплексе *ANSYS*: для моделирования применялись элементы типа *PLANE82* с треугольной и четырехугольной конфигурацией с плоской деформацией (*3950* узлов и *1890* конечных элементов). Внешний слой конструкции (подстилающий) имел большие коэффициенты демпфирования, но сохранял основные свойства слоя 1. Анализируемое время выбиралось таким, чтобы импульс от крайних границ конструкции не возвращался обратно. Это достигалось фиксацией времени резкого возрастания амплитуд колебаний у внешней границы слоя 1. Ударная нагрузка прикладывалась в точке P_t на поверхности конструкции.

Вследствие импульсного нагружения возникают поперечные и продольные волновые смещения точек как на поверхности конструкции, так и по всему ее объёму. Пример формы поперечных колебаний конструкции в момент времени $t = 0{,}01$ *с* представлен на рис. 3. Контрольные точки (40 точек) расположены на поверхности на расстоянии $dk = 0{,}1$ *м* друг от друга (рис. 1). Имитация распределения точек на поверхности отображает реальную картину измерений. Первая точка измерений расположена на расстоянии *0,1 м* от места ударного воздействия.

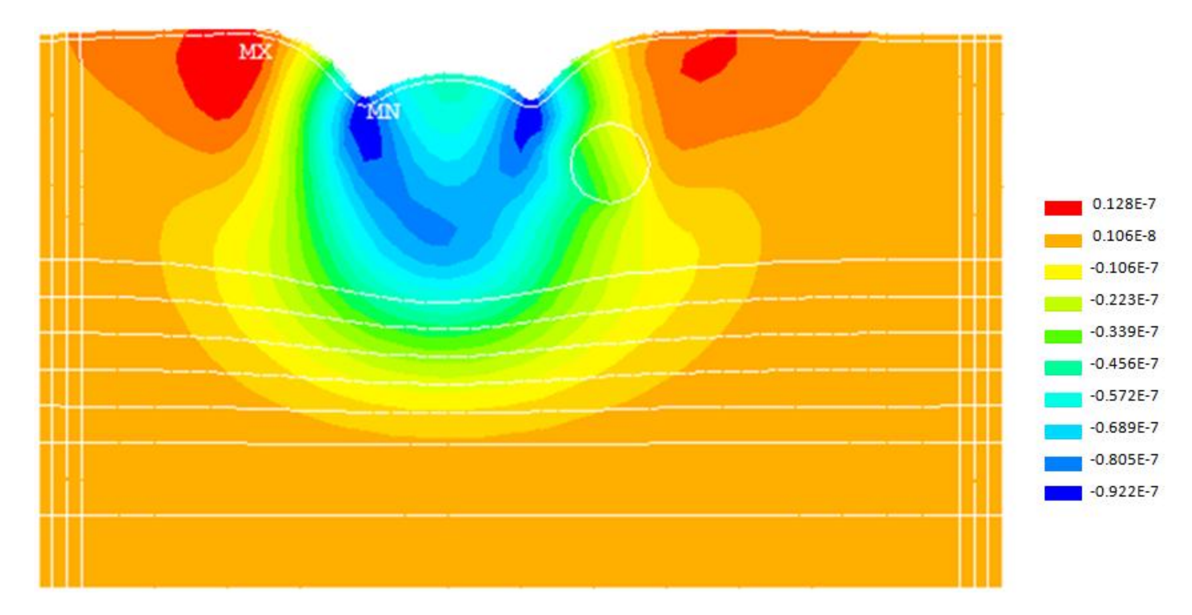


Рис. 3. Волновые смещения по толщине конструкции при $t = 0{,}01$ *с*

На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов поперечных смещений (направление OY) в различных точках поверхности. В процессе решения задачи вычисляли поперечные смещения в контрольных точках конструкции на временном интервале t = 0–0,1 с. Особый интерес представляет поле смещений точек поверхностного слоя в промежутке времени t = 0–0,04 с. В данный период времени образуется первичная форма прогибов слоистой конструкции и отсутствуют отклики колебаний от возбуждения внешних слоев конструкции.

На рис. 5 приведены максимальные значения амплитуд колебаний в зависимости от времени их регистрации. Анализ показывает, что они имеют экспоненциальный приближенный тренд. Для одинаковых позиций измерения максимумов амплитуд имеются расхождения амплитуд колебаний в зависимости от величины радиуса дефекта.

На последующем этапе вычислены относительные значения смещения амплитуд ΔU_y (*a*), скорости ΔV_y (*b*) и ускорения ΔA_y (*c*) для точек N_p=1–40. Данные относительные значения вычислялись как разница между текущим показателем максимальной амплитуды для точки при R_i (при $i=2-7$) и амплитудой параметра колебаний при размере дефекта $R_1=0$ *(отсутствие дефекта в конструкции):*

$$\Delta U_{yi}=U_{yi}-U_{y1};$$

$$\Delta V_{yi}=V_{yi}-V_{y1};$$

$$\Delta A_{yi}=A_{yi}-A_{y1}.$$

Ни рис. 6 приведены трехмерные графики, отображающие зависимости относительных величин смещения амплитуд ΔU_y (*a*), скорости ΔV_y (*b*) и ускорения ΔA_y (*c*) для точек N_p=1–40 на поверхности конструкции и варианта радиуса R_i дефекта.

$U_y, m \cdot 10^{-7}$

a)

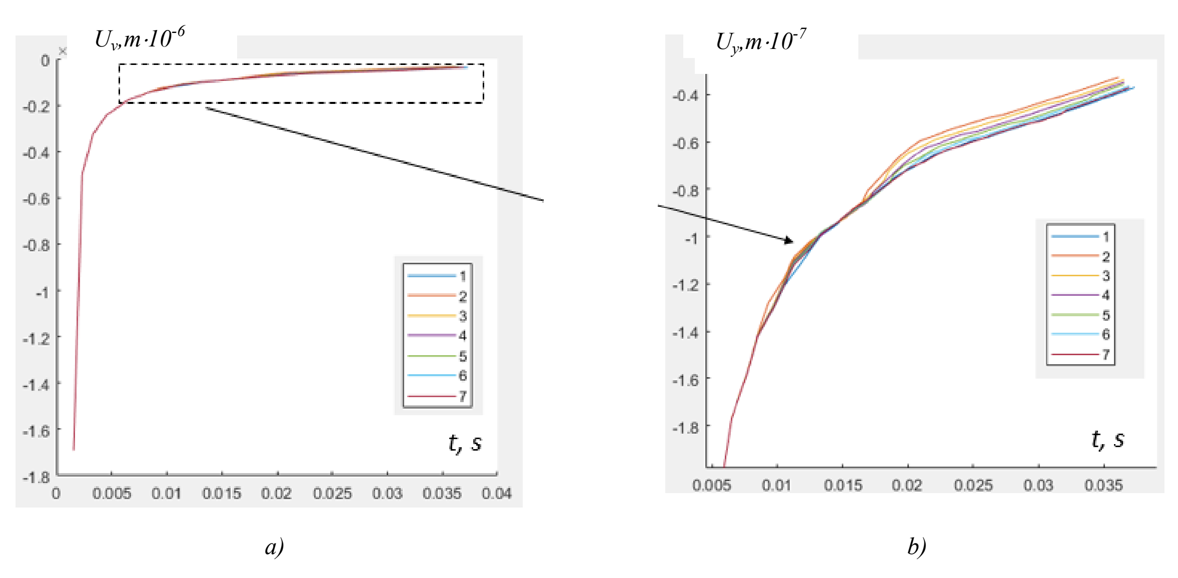
$V_y, m/s \cdot 10^{-5}$

b)

$A_y, m/s^2$

c)

Рис. 4. Амплитуды смещений U_y *(a)*, скорости V_y *(b)* и ускорения A_y *(c)* в зависимости от времени для точек 1–40 на поверхности конструкции



a)

b)

Рис. 5. Зависимости максимальных перемещений:
a — от времени для точек 1–40 на поверхности конструкции для семи вариантов радиусов дефекта;
b — для выделенной области амплитуд

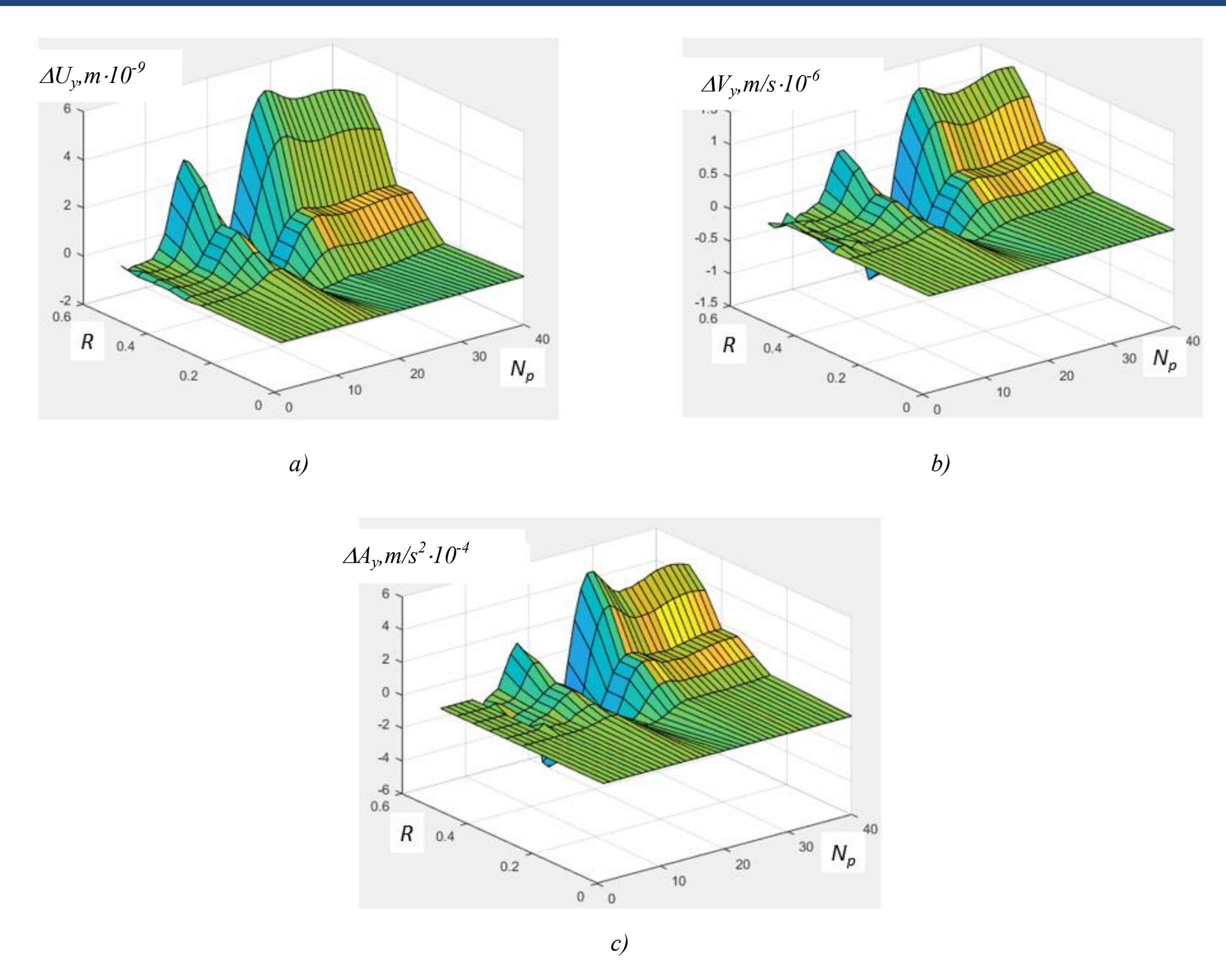


Рис. 6. Относительные значения амплитуд смещения ΔU_y *(a)*, скорости ΔV_y *(b)* и ускорения ΔA_y *(c)* для точек N_p*=1–40* на поверхности конструкции и варианта радиуса R_i дефекта

Центр дефекта располагался под точкой P_{20}. Анализ данных графиков показывает, что слева и справа в окрестностях дефекта возникают перегибы кривых максимальных амплитуд колебаний относительных значений перемещения ΔU_y, скорости ΔV_y и ускорения ΔA_y. Эта тенденция сохраняется при всех вариациях радиуса дефекта R_i. Этот признак тем самым может являться показателем локации дефекта. Такие эффекты на практике возможно достичь путем позиционного сканирования при регистрации и обработке амплитуд колебаний. Кривые относительных показателей перемещения, скорости и ускорения в окрестности дефекта достаточно хорошо коррелируют с величиной дефекта.

Применение нейросетевых технологий в задаче идентификации размеров скрытого дефекта. Установим связь между скоростью, ускорением и амплитудами колебаний, распространяющимися в слоистой структуре, и радиусом дефекта R_i. На основе полученных данных на этапе *КЭ* моделирования формируется обучающий набор, с помощью которого обучается построенная модель *ИНС*.

В результате численного решения ряда прямых задач в *КЭ* программном комплексе *ANSYS* были получены данные для 40 точек на поверхности слоистой структуры при вариациях радиуса дефекта R_i с ошибкой при вычислении в пределах *3%*. Для каждого набора из 40 значений был установлен соответствующий радиус дефекта. Подготовленные обучающие вектора в качестве входных значений содержали относительные величины амплитуд колебаний $\Delta U_y(N_{pi})$ скорости $\Delta V_y(N_{pi})$ и ускорения $\Delta A_y(N_{pi})$, а в качестве выходных значений — радиус дефекта. Всего было проведено 100 численных экспериментов. Таким образом, обучающая выборка состоит из 100 векторов для каждого типа исследуемого параметра ΔU_y, ΔV_y и ΔA_y. Все данные, применяемые в обучении нейронной сети, нормализованы и находятся на интервале [0, 1].

Для идентификации радиуса дефектного включения применялась полносвязная многослойная модель *ИНС*, смоделированная в комплексе *Matlab*. Модель *ИНС* содержала 1 слой, состояла из 40 входных нейронов и 1 выходного нейрона. В качестве входной активационной функции выбиралась Sigmoid, а в качестве выходной активационной функции устанавливалась линейная зависимость. Сеть обучалась с помощью алгоритма обратного распространения ошибки на основе оптимизации Левенберга-Марквардта [37].

Функция потерь характеризовалась среднеквадратической ошибкой (*MSE*). Для обучающей и тестовой выборки было построено 100 векторов из показателей относительных величин амплитуд колебаний ΔU_y,

скорости ΔV_y и ускорения ΔA_y. Найдена корреляции данных параметров к радиусу дефекта. Установлено, что 8, 10 и 20 эпох обучения для соответствующих показателей достаточны для достижения необходимого уровня качества работы *ИНС. На* рис. 7 приведена зависимость средне-квадратической ошибки от количества эпох обучения модели *ИНС.* Анализ показывает, что при достижении обучения более 8 эпох для всех относительных параметров амплитуд колебаний средне-квадратическая ошибка (*MSE*) изменяется незначительно.

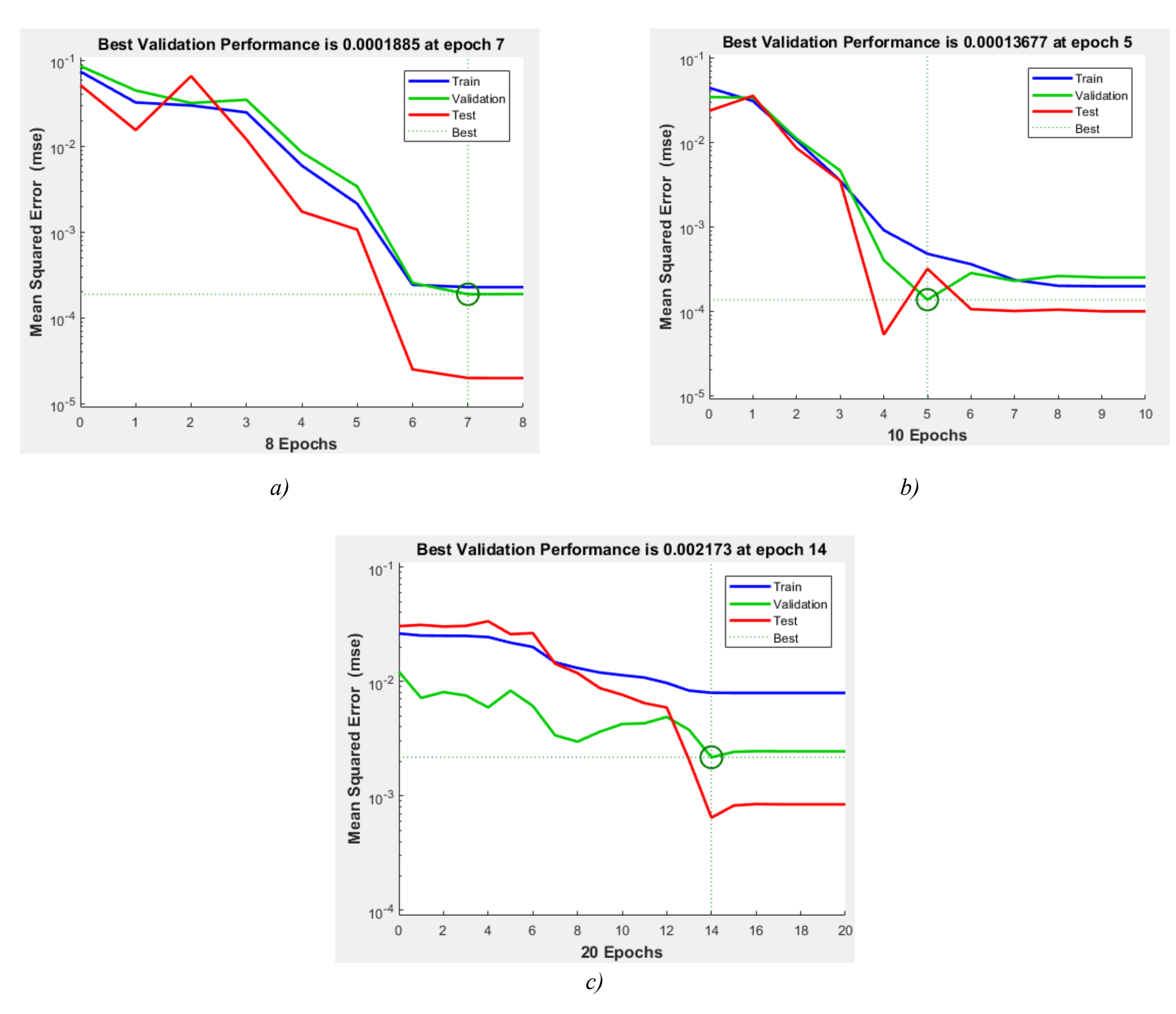


Рис. 7. Изменение средне-квадратической ошибки *(MSE)* работы *ИНС* в процессе её обучения на основе значений относительных величин колебаний: *a* — амплитуд ΔU_y, *b* — скорости ΔV_y и *c* — ускорения ΔA_y

Таблица 2

Оценка точности вычислений

Используемая *ИНС*	Относительная ошибка, %
ΔU_y	0,50
ΔV_y	3,03
ΔA_y	16,70

Тестирование полученных зависимостей *ИНС.* Для выборочной оценки восстановления показателя радиуса дефекта R_i были выполнены наборы из параметров амплитуд колебаний и получены их относительные значения. Графическое отображение результатов трех тестовых наборов для относительных величин амплитуд колебаний ΔU_y *(a)*, скорости ΔV_y *(b)* и ускорения ΔA_y *(c)* представлены на рис. 8. Данные показатели наборов подставляли в соответствующую *ИНС* и вычисляли значения радиуса дефекта. В таблице 2 приведена рассчитанная погрешность восстановленного радиуса *R* дефекта. Анализ показывает, что наименее точным является восстановление радиуса по параметрам ускорения. При этом средняя относительная ошибка восстановления параметра радиуса *R* дефекта на основе данных амплитуд колебаний ΔU_y и скорости ΔV_y не превосходит 5%.

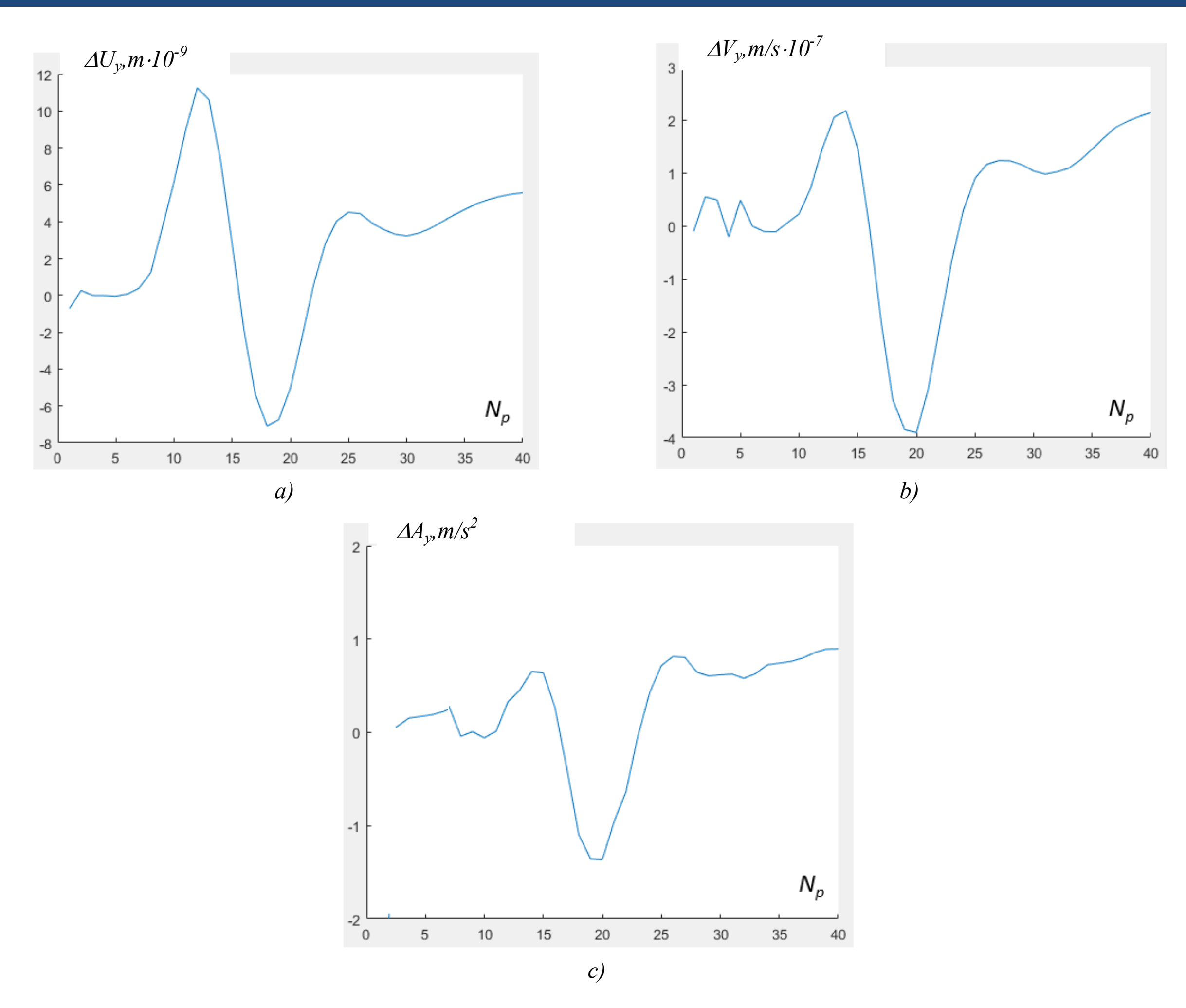


Рис. 8. Набор рассчитанных относительных величин амплитуд колебаний ΔU_y *(a)*, скорости ΔV_y *(b)* и ускорения ΔA_y *(c)*

Обсуждение и заключения. Рассмотрена задача о восстановлении радиуса дефекта на основе применения имитационного моделирования колебаний в конечно-элементном комплексе *ANSYS* и *ИНС* в комплексе *MATLAB*. Получены результаты нестационарных колебаний полуплоскости с круглым внутренним дефектом. Вычислены поперечные смещения в контрольных точках конструкции при распространении волны от импульсного нагружения. В результате был разработан подход к восстановлению радиуса дефекта в конструкции на основе сочетания метода конечных элементов и *ИНС*. Наиболее удачная конфигурация архитектуры *ИНС*, состоящей из 1 скрытого и 1 выходного слоев, включала 40 входных нейронов и 1 выходной нейрон.

Исследование показало, что использованного объема данных достаточно для успешного обучения построенной модели и проведения идентификации скрытого дефекта конструкции. При этом относительная точность определения радиуса дефекта внутри слоя 1, в случае применения значений амплитуд колебаний перемещения и скорости, составляет более 99 %.

Таким образом построенные *ИНС*-алгоритмы могут успешно применяться для оценки стратификации слоистых конструкций при использовании временного и позиционного сканирования при возбуждении колебаний из дальней зоны.

Библиографический список

1. Неразрушающие методы контроля / под ред. В. Я. Кершенбаума. — Москва : Наука и техника. — 1992. — 656 с.

2. Белокур, И. П. Дефектология и неразрушающий контроль / И. П. Белокур. — Киев : Выща школа. — 1990. — 208 с.

3. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций / В. А. Акопьян, А. В. Черпаков, Е. В. Рожков, А. Н. Соловьев // Контроль. Диагностика. — 2012. — № 7. — С. 50–56.

4. Капцов, А. В. Определение параметров плоской эллиптической трещины в изотропном линейно упругом теле по результатам одного испытания на одноосное растяжение / А. В. Капцов, Е. И. Шифрин,

П. С. Шушпанников // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2012. — № 4. — С. 71–88.

5. Sedov, A. V. Adaptive-spectral method of monitoring and diagnostic observability of static stresses of elements of mechanical constructions / A. V. Sedov, V. V. Kalinchuk, O. V. Bocharova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — 87(8). — P. 082043.

6. Соловьев, А. Н. Ультразвуковая локация внутренних трещи ноподобных дефектов в составном упругом цилиндре с применением аппарата искусственных нейронных сетей / А. Н. Соловьев, Б. В. Соболь, П. В. Васильев // Дефектоскопия. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 3–9.

7. Xia, J. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves / J. Xia, R. D. Miller, C. B. Park // Geophysics. — 1999. — Vol. 64, no. 3. — P. 691–700.

8. Esipov, Y. V. Criteria for identification of stress state of periodic rod construction based on ferroelectric sensors of deformation / Y. V. Esipov, V. M. Mukhortov, I. I. Pojda // Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. — 2012. — P. 283−291.

9. Evtushenko, S. I. Identification of soils, grounds and lands strata using the acoustic spectral analysis / S. I. Evtushenko, V. A. Lepikhova, N. V. Lyashenko [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 913. — P. 052043. DOI:10.1088/1757-899X/913/5/052043

10. Ильгамов, М. А. Диагностика повреждений балки на шарнирных опорах / М. А. Ильгамов, А. Г. Хакимов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2010. — № 2. — С. 42–48.

11. Park, C. B. Combined use of active and passive surface waves / C.B. Park, R.D. Miller, N. Ryden [et al.] // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. — 2005. — Vol. 10, no. 3. — P. 323−334.

12. Brigante, M. Acoustic Methods for the Nondestructive Testing of Concrete: A Review of Foreign Publications in the Experimental Field / M. Brigante, M. A. Sumbatyan // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2013. — Vol. 49, no. 2. — P. 100–111.

13. Park, C. B. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW) / C. B. Park, R. D. Miller // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. — 2008. — Vol. 13, no. 1. — P. 1–11.

14. Lyapin, A. A. Improving Road Pavement Characteristics / A. A. Lyapin, I. A. Parinov, N. I. Buravchuk [et al.] // Springer, Cham. — 2020. — 254 p. DOI: 10.1007/978-3-030-59230-1

15. Haykin, S. Neural Networks: a comprehensive foundation / S. Haykin. — 2nd ed. — Prentice Hall. — 1998. — 842 p.

16. Krasnoshchekov, A. A. Identification of crack-like defects in elastic structural elements on the basis of evolution algorithms / A. A. Krasnoshchekov, B. V. Sobol, A. N. Solov'ev [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2011. — 47(6). — 412−419.

17. Waszczyszyn, Z. Neural networks in mechanics of structures and materials – new results and prospects of applications / Z. Waszczyszyn, L. Ziemianski // Computers and Structures.— 2001. — Vol. 79, iss. 22−25. — P. 2261−2276.

18. Зиновьев, А. Ю. Визуализация многомерных данных / А. Ю. Зиновьев. — Красноярск : Изд-во Красноярского государственного технического университета. — 2000. — 180 с.

19. Liu, S.W. Detection of cracks using neural networks and computational mechanics / S.W. Liu, J.H. Huang, J.C. Sung [et al.] // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2002. — Vol. 191, iss. 25−26. — P. 2831−2845. DOI: 10.1016/S0045-7825(02)00221-9

20. Khandetsky, V. Signal processing in defect detection using back-propagation neural networks / V. Khandetsky, I. Antonyuk // NDT&E International. — 2002. — Vol. 35, iss. 7. — P. 483−488.

21. Xu, Y.G. Adaptive multilayer perceptron networks for detection of cracks in anisotropic laminated plates / Y.G. Xu [et al.] // International Journal of Solids and Structures. — 2001. — Vol. 38. — P. 5625−5645.

22. Fang, X. Structural damage detection using neural network with learning rate improvement / X. Fang, H. Luo, J. Tang // Computers and Structures. — 2005. — Vol. 83. — P. 2150–2161.

23. Hernandez-Gomez, L. H. Locating defects using dynamic strain analysis and artificial neural networks / L. H. Hernandez-Gomez, J. F. Durodola, N. A. Fellows [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2005. — Iss. 3−4. — P. 325−330.

24. Soloviev, A. Identification of crack-like defect and investigation of stress concentration in coated bar / A. Soloviev, B. Sobol, P. Vasiliev // In: Springer Proceedings in Physics. — 2019. — Iss. 4. — P. 165−174.

25. Pozharskii, D.A. Periodic crack system in a layered elastic wedge / D.A. Pozharskii, V.N. Sobol’, P.V. Vasil’ev // Mechanics of Advanced Materials and Structures. — 2020. — Vol. 27(4). — P. 318−324.

26. Cherpakov, A.V. The Study of Stratification of Multilayer Structures Based on Finite Element Modeling and Neural Network Technologies / A. V. Cherpakov, P. V. Vasiliev, A. N. Soloviev [et al.] // Advanced Materials. Proc. Int. Conf. on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications, PHENMA 2019. — 2020. — P. 439−447. DOI: 10.1007/978-3-030-45120-2

27. Ватульян, А. О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела / А. О. Ватульян. — Москва : Физматлит. — 2007. — 224 с.

28. Многократное рассеяние ультразвуковых волн на системе пространственных дефектов канонической формы (теория и эксперимент) / Н. В. Боев, Х. М. Эль-Мараби, В. А. Вдовин, В. М. Зотов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2012. — № 12 (3). — С. 5–10.
29. Lyapin, A. Structural Monitoring of Underground Structures in Multi-Layer Media by Dynamic Methods / A. Lyapin, A. Beskopylny, B. Meskhi // Sensors. — 2020. — 20(18). — P. 5241. DOI: 10.3390/s20185241
30. Идентификация параметров повреждений в упругом стержне с использованием конечно-элементного и экспериментального анализа мод изгибных колебаний / А. В. Черпаков, В. А. Акопьян, А. Н. Соловьев [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 3 (54). — С. 312–318.
31. Cherpakov, A.V. Simulation of wave processes in the multilayer structure surface layer properties identification by the finite element method / A. V. Cherpakov, O. V. Shilyaeva, M. N. Grigoryan [et al.] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2019. — Vol.698. — P. 066021.
32. Cogranne, R. Statistical detection of defects in radiographic images using an adaptive parametric model / R. Cogranne, F. Retraint // Signal Processing. — 2014. — Vol. 96, part B. — P. 173−189.
33. Ватульян, А. О. Поперечные колебания балки с локализованными неоднородностями. / А. О. Ватульян, А. В. Осипов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2012. — №12(8). — С. 34–40.
34. Shevtsov, S. N. Piezoelectric Actuators and Generators for Energy Harvesting / S. N. Shevtsov, A. N. Soloviev, I. A. Parinov [et al.] // Heidelberg, Springer. — 2018. — 182 p.
35. Васильченко, К. Е. К расчету амплитудно-частотных характеристик задач об установившихся колебаниях на основе кластерных технологий в ACELAN / К. Е. Васильченко, А. В. Наседкин, А. Н. Соловьев // Вычислительные технологии. — 2005. — Т. 10, № 1. — С. 10–20.
36. 36. Krasil'nikov, V.A. Introduction to Physical Acoustics / V.A. Krasil'nikov, V.V. Krylov // Moscow: Nauka, 1984. — 400 p.
37. Kingma, D. P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. Ba // Proc. 3rd International Conference for Learning Representation, San Diego. — 2015.

Сдана в редакцию 03.08.2020
Запланирована в номер 14.09.2020

Об авторах:

Соловьев Аркадий Николаевич, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ведущий научный сотрудник лаборатории «Вычислительная механика» ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (344006, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID H-7906-2016, ScopusID 55389991900, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554, Solovievarc@gmail.com

Васильев Павел Владимирович, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4112-7449, liftzeigen@mail.ru

Черпаков Александр Владимирович, старший научный сотрудник института «Математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича» ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (344090, РФ, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8 а), доцент кафедры «Информационные системы в строительстве» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3205-1577, alex837@yandex.ru

Паринов Иван Анатольевич, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (344090, РФ, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8 а), доктор технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3833-0331, parinov_ia@mail.ru

Кириллова Евгения Вадимовна, профессор Висбаденского университета, Германия (18, Kurt-Schumacher-Ring, Wiesbaden, 65197, Germany), кандидат физико-математических наук, ScopusID: 24402885500.

Заявленный вклад соавторов:

А. Н. Соловьев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования. А. В. Черпаков — проведение расчетов в КЭ пакете, подготовка текста, формирование выводов. И. А. Паринов — научное руководство, анализ результатов исследований. П. В. Васильев — проведение расчетов, доработка текста, корректировка выводов. Е. В. Кириллова — проведение расчетов, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.